

— 解説② —

最近の気候変動に関するレポートから

札幌管区气象台予報課 金 戸 進

1. はじめに

近年、人間活動に伴う大気中の温室効果気体（二酸化炭素、フロン、メタン、一酸化二窒素、オゾン等）の増加による地球大気の温暖化が心配されている。ここでは、気象庁が1974年以来5年毎に発表している「異常気象レポート」と、1990年に発表されたIPCC（気候変動に関する政府間パネル）報告「気候変動の科学的評価」などをもとに、温暖化問題の経過をたどってみる。

2. 観測事実と放射平衡理論

気候変動と温室効果気体の増減になんらかの関係があることは確かである。南極の3000mの厚さにもおよぶ氷床に捕らえられた空気の分析によると（図-1）、最近の1-6万年間の気温の変動幅は10°C程度にも達しており（重水素濃度による推定）、その変動は二酸化炭素濃度の変動と良く一致している。この間、二酸化炭素濃度は180~300ppmvで変動しており、最近1万年間はほぼ280ppmvで一定であった。また、別の氷床コアによる最近2世紀の二酸化炭素濃度資料（図-2）からは、17世紀の産業革命以後の増加が明らかで、1958年以降の高精度の実測では、現在350ppmvを越えるまでになっている。一方、最近100年間の気温上昇は、全球平均で0.3~0.6°Cと推定されている（図-3）。しかし、これらの観測事実だけでは関係があるということは出来るがどちらが原因なのかははっきりしない。

放射平衡理論は惑星の表面温度を推定するものとして一般的である（表-1）。地球の場合、大気に温室効果気体が含まれない場合、地球表面温度は現在より33°Cも低いことが計算されており、大気の大部分が温室効果気体の金星ではその差は523°Cにおよんでいる。これはアルベドなどほかの条件が全く変わらないことを仮定してはいるが、上の関係をよく説明している（詳細は細水35号など）。

3. 気候モデル

より細かく気候変動を調べるために、気候状態を決める基本的な要因を含んだ気候モデルが使われている。ここで、さまざまな気候モデルをIPCC報告から見てみよう。気候モデルは、CO₂倍増実験グループとCO₂増加実験グループに分けられる（表-2、3）。どちらも全球モデルで大気と海洋の相互作用も扱いは多少異なるが取り入れられている。CO₂倍増実験では、現在の大気中CO₂濃度を用いたコントロール実験ならびにCO₂濃度倍増における変動実験の双方について、平衡状態の気候に至るまで十分長い時間積分が行われ比較されるが、場合によっては今日の計算機では平衡状態に至らない。一方のCO₂増加実験は、実際の大気中のCO₂濃度増加率または想定される増加率で徐々に増加させるもので、海洋の熱輸送を忠実に

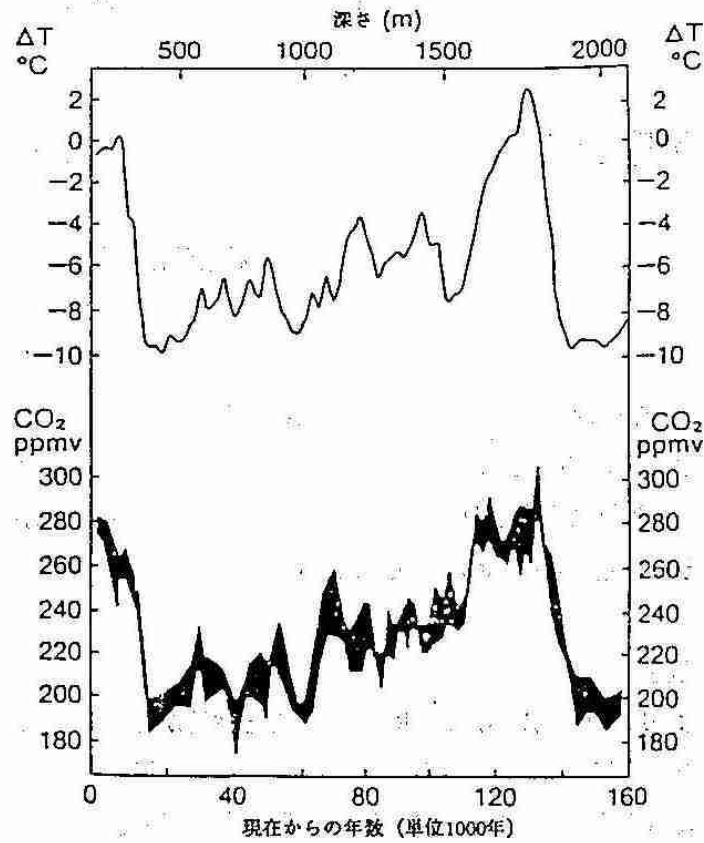


図-1 過去16万年間のCO₂濃度(下)と推定した気温変化(上)。
南極ポストーク基地の水床コアにより求められた。気温変化は重水素濃度からの推定。

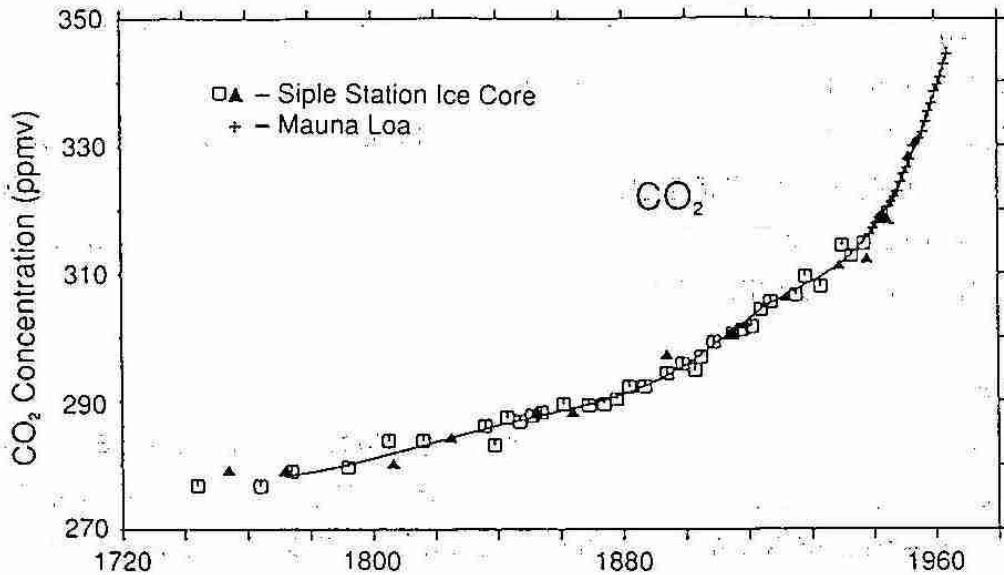


図-2 過去250年間の大気中のCO₂濃度の増加。
南極サイプル基地の水床コア中の大気(□、▲)と、ハワイ、マウナロアの大気(+)

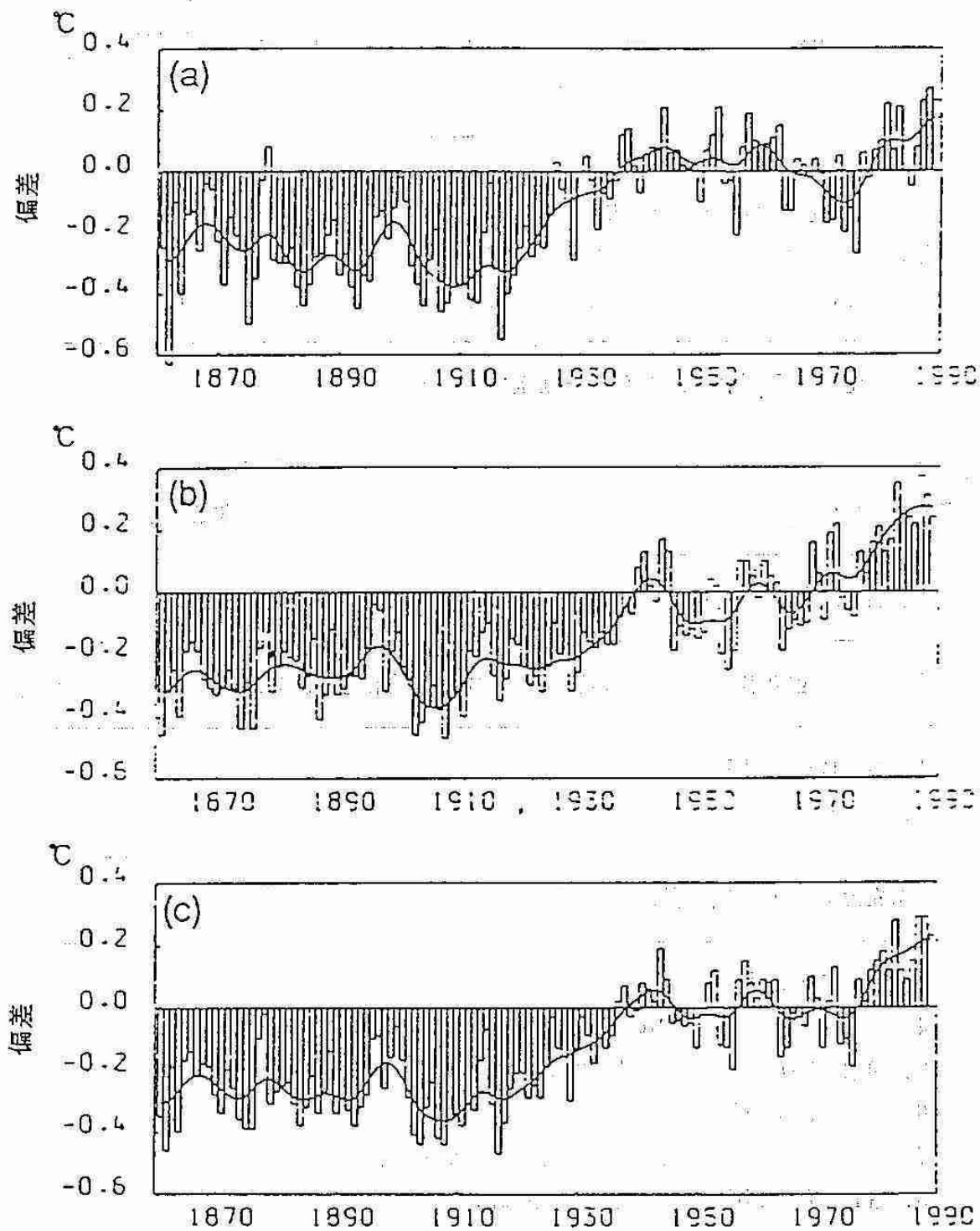


図-3 1861~1989年の地上気温 (a) 北半球 (b) 南半球 (c) 全球。
陸上気温と海面水温を結合し、1951~1980年の平均からの偏差で表す。

表-1 惑星大気の成分と推定される地表面温度および観測された地表面温度。

惑星	大気成分	地上気圧	温室効果が 無いとしたときの 地表面温度	観測された 地表面温度	温室効果
金星	CO ₂ (>90%)	90気圧	-46°C	477°C	523°C
地球	N ₂ , O ₂	1気圧	-18°C	15°C	33°C
火星	CO ₂ (>80%)	0.007気圧	-57°C	-47°C	10°C

地球の温室効果気体はCO₂~0.04%, H₂O~1%

表-2 CO₂倍増実験の概要(すべて、現実的な地形と日射の季節変化を考慮)

実験番号	実験機関	備考
雲分布は東西方向に一様、海洋の熱輸送はない、日変化を含まない		
1.	GFDL (米国)	
2.	"	
雲分布は可変的、海洋の熱輸送はない、日変化を含まない(5以外)		
3.	OSU (米国)	
4.		(3)の雲の取扱を改善
5.	気象研究所(日本)	平衡状態に未到達
6.	NCAR (米国)	
7.	"	(6)の海水と積雪のアルベドを改善
8.	GFDL (米国)	(2)に雲の変化を計算
雲分布は可変的、海洋の熱輸送をあらかじめ与える、日変化を含む(13, 14以外)		

- 9. AUS (オーストラリア)
- 10. GISS (米国)
- 11. " 鉛直方向の層の数を増加
- 12. " (11)で多すぎる海水を制御
- 13. GFDL (米国)
- 14. MGO (ソ連) 進行中
- 15. UKMO (英国)
- 16. " (15)で表面過程を改善
- 17. " (16)に雲水量スキームを導入
- 18. " (17)で氷形成過程を変更
- 19. " 雲の放射特性が可変

水平解像度が高い、日変化を含む (21以外)

- 20. CCC (カナダ)
- 21. GFDL (米国) 海面水温は(13)の結果を与える
- 22. UKMO (英国) (18)に重力波トラップを導入

表-3 CO₂増加実験の概要 (すべて、現実的な地形と日射の季節変化を考慮)

実験番号	実験機関	備考
1.	GFDL (米国)	年1%のCO ₂ 増加率で100年間積分
2.	NCAR (米国)	年1%のCO ₂ 増加率で30年間積分、雲分布を固定
3.	MPI (ドイツ)	CO ₂ 倍増の下で25年間積分、日変化を含まない
4.	UHH (ドイツ)	CO ₂ 倍増の下で25年間積分、日変化を含まない

シミュレートするため、大気と海洋を力学的に結合するモデルが用いられている。

CO₂倍増実験による気温上昇と降水量増加の関係を見よう (図-4)。全球平均昇温量は1.9~5.2°Cで昇温量が大きいモデルでは降水量変化率 (増加) も大きい。ただし、昇温にともなって蒸発量も増加する

ので、必ずしも陸面がより湿ることではない。このほか、モデル間で一致している大規模な変化として、以下の点があげられている。

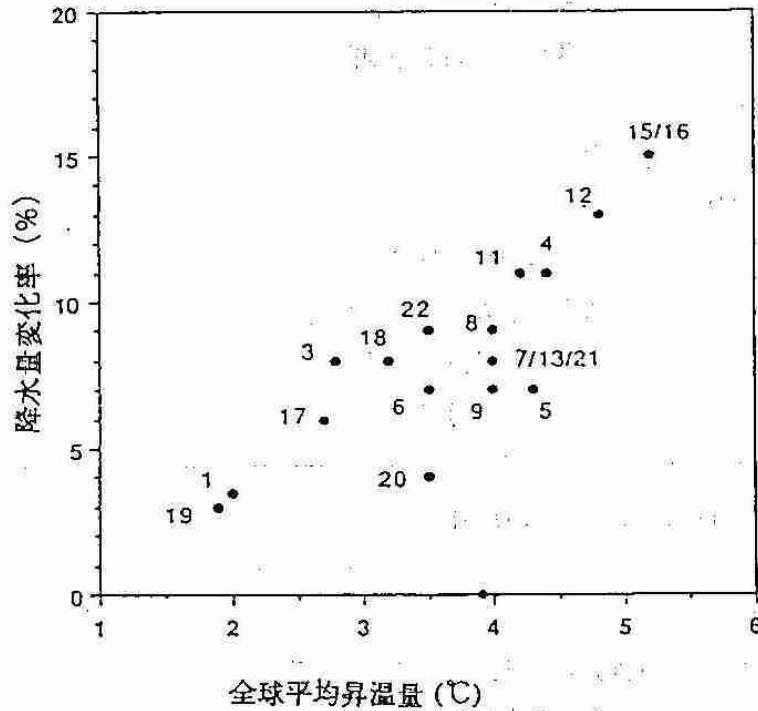


図-4 CO₂倍増実験による気温上昇と降水量増加の関係。
数字は表-2の実験番号。

気温では、

- (1) 全てのモデルでは地表面及び対流圏（下層大気）が昇温し、成層圏が降温する。
- (2) 全てのモデルでは高緯度で晩秋から冬にかけて昇温が著しい。
- (3) 北極域の海氷上では夏期の昇温は全球平均より小さく、南極周辺でも同様である。
- (4) どのモデルでも熱帯域の昇温はほぼ2~3°Cであり全球平均より小さく、季節による違いも少ない。
- (5) 北半球中緯度大陸上、夏期の昇温はほとんどのモデルで全球平均よりも大きい。

降水では、

- (1) 高緯度及び熱帯では年中、中緯度では冬期に、全てのモデルで降水が増加する。
- (2) 亜熱帯乾燥帯では増加域、減少域はあるが、全般に変化は小さい。
- (3) 南西アジアモンスーンの強化に伴って降水が増加することを多くのモデルは示しているが、全体的に大陸スケール以下での変化はモデル間で異なっており、特に熱帯域では違いが大きい。

土壌水分では、

- (1) 全てのモデルで、冬期北半球高緯度の大陸上で土壌水分が増加する。
- (2) ほとんどのモデルでは夏期、北半球中緯度で地表面の大規模な乾燥化が起きる。

平均海面気圧では

- (1) 南半球中・高緯度では年中気圧の南北経度が減少しており、中緯度の西風の弱まりを示唆している。

- (2) 12, 1, 2月には、ほとんどのモデルでニューファンドランド島沖で気圧が高まっており、アイスランド低気圧の東偏、シベリア高気圧の弱まりに関係して東シベリア域での気圧の低下がみられる。
- (3) 6, 7, 8月には、ユーラシアで気圧が低下し、モンスーン低気圧を強め、インドでは気圧が上昇し、モンスーントラフの北上を示唆している。アゾレス高気圧の弱まりも見られる。

CO₂増加実験の結果が発表されているのはこの時点で3例だが、これらのモデルの気温変化についての共通点として、

- (1) どの時点においても昇温は倍増実験の平衡値よりも小さい。
- (2) 昇温を示す地域は低緯度よりも北半球高緯度で一般に大きいのが、実験初期の段階では東西方向に一様ではない。
- (3) 自然変動と比較して大きな昇温が亜熱帯海域でみられる。

CO₂倍増実験の結果を、アジア極東域に注目して紹介している「温室効果気体の増加に伴う気候変化(II)」(1990、気象庁気候問題懇談会温室効果検討部会)から各モデルの結果を示す(図-5)。IPCC報告では気象研究所(MRI)のモデルは一つだけであったが、ここでは海面水温を1~2℃上昇させた実験も含まれている。

気象研究所の通常実験では昇温域の極大がシベリアと北太平洋に現れているが、北太平洋の昇温はほかのモデルと大きく異なっている。この点について「異常気象レポート'89」は、このモデルでのコントロール実験ではこの付近まで海水域になっていて、観測に比べモデルは高緯度で低温になっているとして、実際の昇温はもっと高緯度で起こると予想されるとしている。なお、気象研究所の通常実験と海水温上昇実験では気温上昇量の程度がかなり異なっている。

4. 異常気象レポートから

「異常気象レポート」(近年における世界の異常気象と気候変動—その実態と見通し—)が発表されるようになったきっかけは、1974年当時さかんに話題にされた、氷河期に向かっているのではないかという疑問に答えるものであった。確かに、当時の状況を見てみると、北半球の高緯度を中心に寒冷化の傾向が見られ、一方でエルニーニョによるイワシの漁獲減少に伴う大豆の高騰など食料危機が言われ、さらにローマ・クラブによる「成長の限界」が発表されるなど、人間活動と地球環境の関連に目が向けられ始めた時期である。

このときの「異常気象レポート」では、とりあげている気候の寒冷化は高々数十年または百数十年の気候変動の問題であり氷期、間氷期とは時間尺度が二桁ぐらもちがう異質の問題であるとしており、寒冷化の傾向は、太陽活動や気候変動の周期性と持続性を前提として予測する時には、十数年続くことが考えられるとしている。なお、気候変動の原因としては、太陽活動、火山爆発、細塵(エアロゾル)、炭酸ガス、人工熱源があげられており、特に際だって確定的とみなし得る学説はないとしている。

氷河期は、今から200万年位前から1万年前までに地球の気温が約10万年の周期で5~7℃変動し、氷河・氷

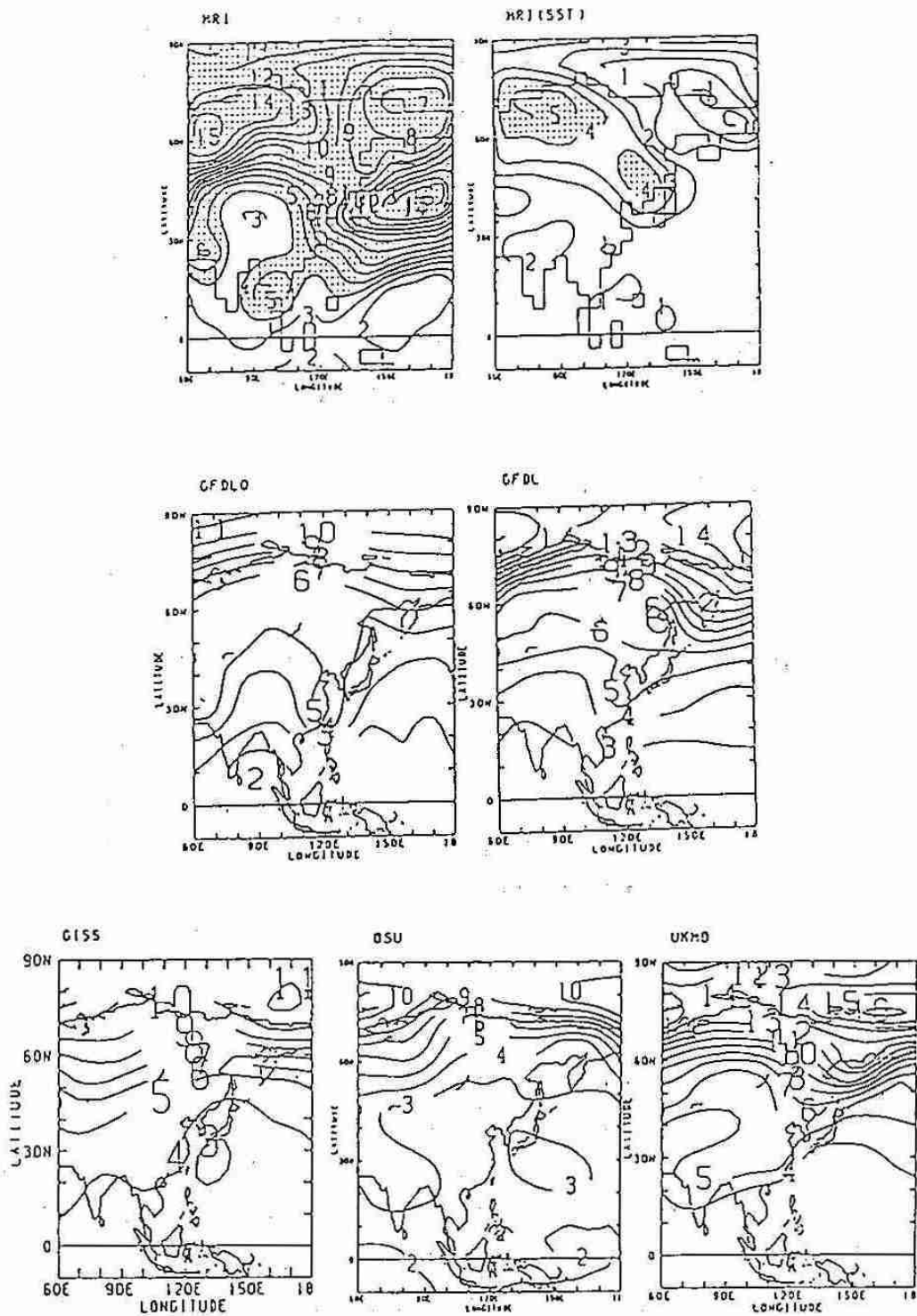


図-5 CO₂倍増実験による1、2、3月平均の地上気温の変化(単位は°C)。
 【上左】 気象研究所モデル(実験番号5) 【上右】 気象研究所モデル(海水温上昇)
 【中左】 GFDLモデル(13) 【中右】 GFDLモデル(8)
 【下左】 GISSモデル(11) 【下中】 OSUモデル(4) 【下右】 UKMOモデル(16)

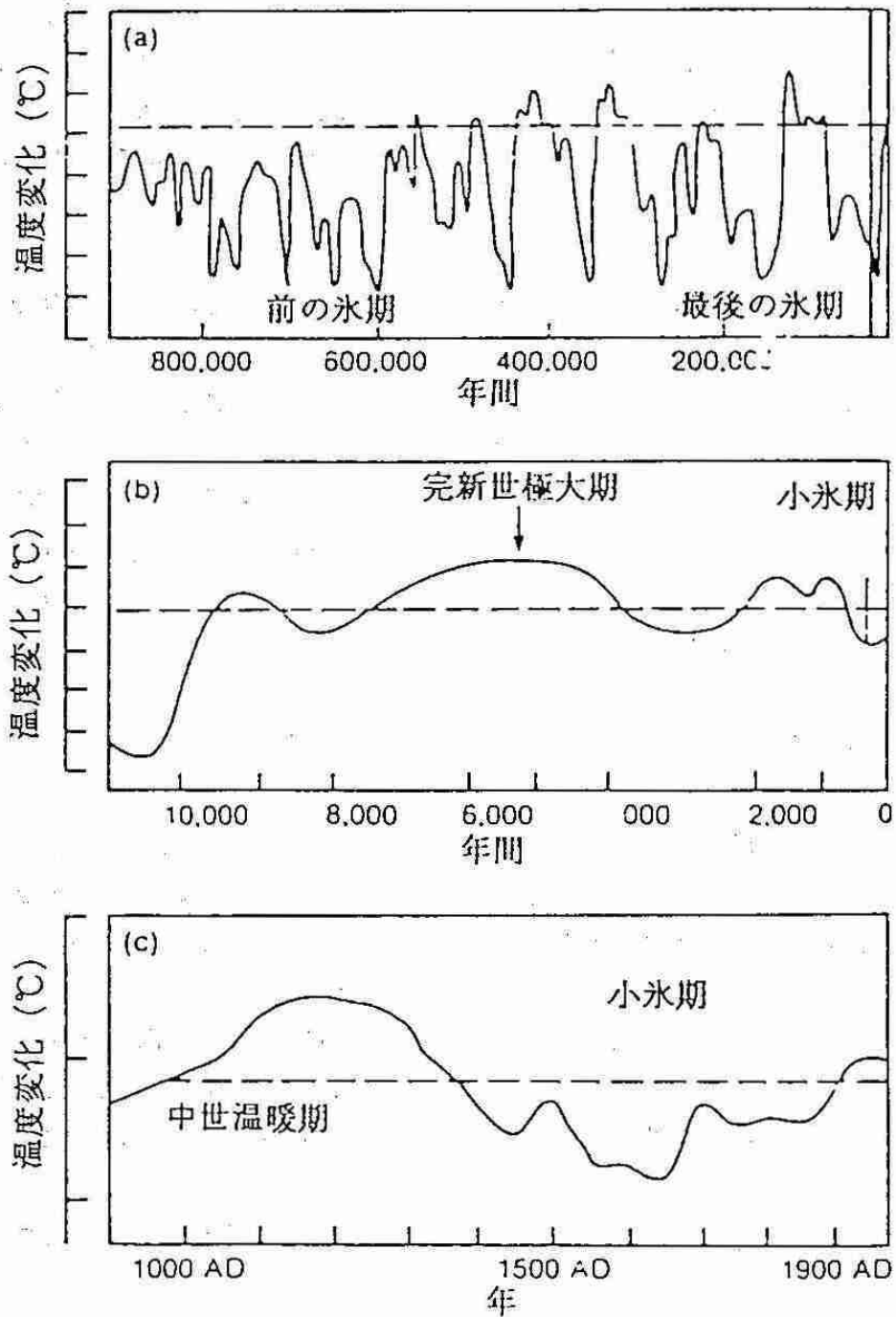


図-6 更新世以降の、3つの時間スケールの全球気温変動の概要。

(a) 過去100万年、(b) 過去1万年、(c) 過去1000年。

破線は、20世紀始め頃の状態を表す。目盛りは1°C毎。

床面積と海面水位も大きく変化した時期である(図-6)。現在は、約1万年前に始まった間氷期が続いており、この間の気温変動幅は2°C程度だが、この程度の変動でも、約6000年前を中心とする温暖期(完新世極大期)、12~13世紀の温暖期や15~17世紀の小氷期などの変動が人間活動に大きな影響を与えている。なお、

1974年当時のNOAA（アメリカ海洋大気局）の気候予測に関する見解は、「現在の間氷期は、すでに1万年位を経過しているため、これ以上、あまり長くは続かないかも知れないことが考えられる。今後千年から数千年のうちに、さらに氷期の状態に急速に移行する時期があると想像できる。しかし、多分、このようななりゆきは、今日、唯今の差し迫った危険としての意味で、取り上げられるべきではないであろう。」となっている。

続いて1979年に発表された「異常気象レポート」は、北極地方の寒冷化はおさまったが中緯度で寒冷化しており、数十年ないし百数十年の時間スケールでみた気候の寒冷化傾向は変わっていないとしているが、人間活動により寒冷化が和らげられるとする温暖化説もとりあげられている。ここでは、二酸化炭素の増加による温暖化のほかに人間活動による気候変動の可能性として、フロンと成層圏航空機によるオゾン破壊、都市化・工業化による温暖化・大気汚染、森林の乱伐など広範囲にわたった問題があげられている。さらに、これらのなかでは、二酸化炭素による温暖化作用が欧米で強調されるようになってきているとしている。なお、このときの予測の中で、北極地方の温暖化が中緯度に波及するのに20年ぐらいかかるので、1990年頃から温暖化に向かうという一項目がある。

3回目となる1984年の「異常気象レポート」は、日本での1980年から83年の4年連続の水稲の不作など寒冷化が目立った地域もあったが、北半球平均では昇温傾向がみられ特に高緯度で温暖化が目立ち始めており、今後10年程度の気候は、北半球平均気温は寒・暖を繰り返しながらもゆっくりと上昇すると予想している。このころになって、二酸化炭素が気候に及ぼす影響が数値的に予想されるようになり、21世紀における二酸化炭素の温室効果による気候の温暖化は不可避であるとの見方が強まっているとしている。

最新の1989年の「異常気象レポート」は、数十年後の気候変化の見通しを、以下のように述べている。

- (1) 全球平均の地上気温は温室効果気体による上昇に自然的要因による変動が重なった形で、変動を繰り返しながらも徐々に上昇する。温室効果気体が現在とほぼ同じ増加率で増え続けるとすれば、2030年代に、現在より1.5～3.5℃程度上昇する。
- (2) 全球平均の降水量は増加し、一方、蒸発量も増加する。中緯度の多雨帯は、特に北半球で極方向に移動する。
- (3) 過去の全球平均地上気温と海面水位との相関関係から、1.5～3.5℃の全球平均気温の上昇に伴って、20～110cm海面水位の上昇が起こる。
- (4) 異常気象の発生総数の増減を予測することは困難であるが、気温の上昇傾向により異常高温が増加する。降水分布の変化に伴い、地域により異常多雨あるいは異常少雨が増加する。

この時に予想された気温上昇の程度や海面水位の上昇の程度はその後多少の修正が必要となっているが、定性的には気温が上昇し、海面水位が上昇するとの予想が大勢であることは現在も変わってはいない。この

ような気候変化に伴い様々な災害の増加が予想されているが、一方では、かえって気候状態が良くなる地域も出て来る可能性があり地球全体としては好ましい変化だとする専門家もいる。確かに、これらの数値は地球の歴史から見れば気候変化の程度として特に大きなものではないが、いま温暖化が問題とされる理由は、この様な気候変化が短い時間に起こるといふことのようなのである。

5. おわりに

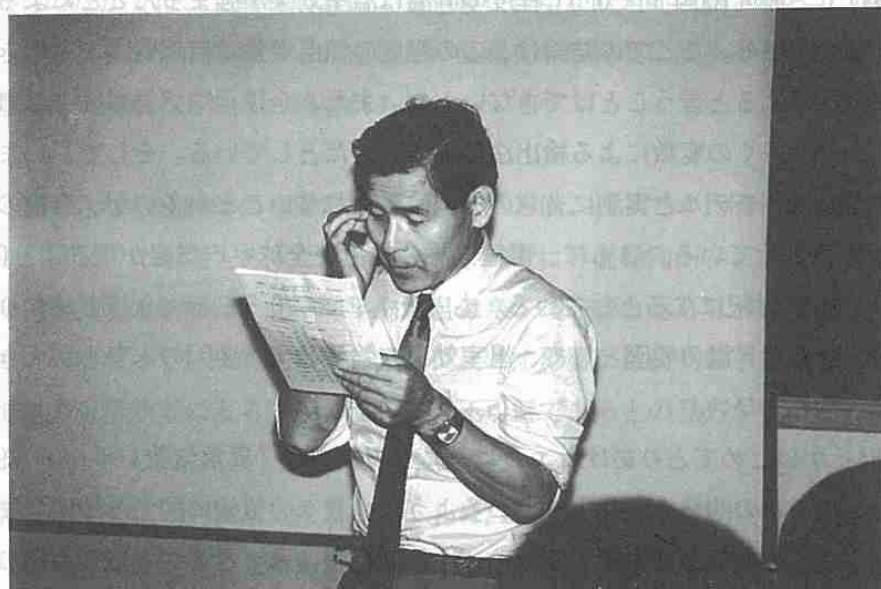
1960年代の北半球高緯度の寒冷化など原因のはっきりしない変動も多い。もちろん、二酸化炭素濃度の変動があった訳でもない。このように、気候変動の原因を特定することはかなり困難である。温暖化については、全球規模で見れば、観測された気候変化と気候モデルによる予測はほぼ一致しているが、モデルに含まれていない気候変化要因も多い。予測についても、モデル間に気候感度などについて違いがあり。また観測されている変化の振幅は小さく、時間的にも空間的にもノイズレベルに近い。IPCC報告では「観測による温室効果の検出」という章を設けて、最近100年間で0.5°C程度の昇温は温室効果が強まったことによる、とはっきり言えるかどうかを論じてさえている。ここでの結論は、この程度の気温変動は自然要因でも起きるので、必ずしも温室効果の強化のみによるということとはできないとし、また、全球平均気温単独では気候変動検出の指標としては不適切で、より多くの変数による検出法によるべきだとしている。そして、いまのところこの多変数を用いた検出法からは、モデルと実測に有意の相関は得られないことが多いが、今後のモデルの改良などで変わる可能性はあるとしている。さらに、温室効果の検出を全球平均気温が現在より0.5°C高くなった時と仮定すると、それは21世紀になるとしている。もっとも、この0.5°Cという値もかなり恣意的であるとしていて、結局、観測された昇温の要因として、温室効果の強化と自然要因のどちらが大きいのか、または同じ程度なのかははっきりしない。

さらに、「異常気象レポート'84」がはじめてとりあげたエルニーニョ現象や、「異常気象レポート'89」がこれまでは全く無かったオゾンホールの問題を取り上げているように、我々の気候に関する知識はまだまだ十分といえるものではない。このような状態に対応するため、IPCC報告は、さまざまな観測網の維持、新しい観測システムの開発と、さまざまな研究計画の推進を求めている。

平成3年度第1回支部研究発表



◀研究発表 竹本明生会員



◀研究発表 大川 隆会員



◀研究発表 清水収司会員